

UTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS PUENTES

de Diego Villalón, A., Gutiérrez Jiménez, J.P., Arteaga Iriarte, A., López Hombrados, C.

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), Madrid, España

Resumen

Los materiales compuestos formados por polímeros armados con fibras (FRP) están comenzando a utilizarse en la construcción de puentes debido a sus ventajosas propiedades como bajo peso, reducidos costes de mantenimiento y su excelente comportamiento frente a la corrosión.

En el campo de la construcción, mientras que la aplicación de estos materiales para el refuerzo de estructuras es bien conocida, su uso en nuevas estructuras ha sido hasta ahora muy limitado. Aunque cada vez se construyen más puentes con materiales compuestos, bien enteramente de FRP o como estructuras híbridas de FRP combinado con hormigón, acero o madera, estos nuevos puentes se consideran todavía como proyectos demostrativos. En este estudio se describe el progreso llevado en el uso de FRP en nuevos puentes, analizándose diversas tipologías de puentes “*all-composite*” y de puentes híbridos que se han construido hasta el momento en todo el mundo. Se presentan también ensayos llevados a cabo en el Instituto Eduardo Torroja en este tema y que fueron aplicados para la construcción en Asturias de un puente carretero con vigas de fibra de carbono y tablero de hormigón.

Estos trabajos forman parte del proyecto “Puentes híbridos de materiales compuestos y hormigón para carretera”, de referencia BIA2004-03404, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia.

1. Introducción

Se entiende por material compuesto aquel formado a partir de dos o más materiales y que se caracteriza por poseer unas propiedades mejores que las de los materiales constituyentes por separado. Los materiales componentes son identificables físicamente existiendo una interfaz entre ellos. Aunque esta definición incluye una gran diversidad de materiales (entre los materiales de construcción el hormigón armado es el ejemplo más habitual), en este trabajo se utiliza el término material compuesto para referirse a los polímeros armados con fibras (*fibre reinforced polymers, FRP*). Se trata de un material formado por dos fases: fibras y matriz. En general las fibras son las responsables de las propiedades resistentes del material compuesto, mientras que la matriz envuelve a las fibras configurando geométricamente el elemento, transmite los esfuerzos entre las fibras y las protege de posibles daños mecánicos o ambientales.

Los FRP han comenzado a utilizarse como materiales de construcción debido a que poseen ciertas propiedades que hacen que su uso pueda resultar potencialmente ventajoso frente a materiales tradicionales como el hormigón o el acero. Entre estas propiedades pueden citarse:

- Gran ligereza y buenas características mecánicas, destacando sus elevadas resistencia y rigidez específicas y buena resistencia a la fatiga. Esto se traduce en economía y facilidad de transporte y puesta en obra, reduciéndose los plazos y costes de ejecución, sin olvidar la reducción de cargas muertas o, en el caso de aplicaciones en refuerzos, la mínima modificación que supone en las dimensiones del elemento reforzado.
- Resistencia a la corrosión y al ataque de agentes ambientales, una ventaja importante en aplicaciones costeras, marinas y en general en todos aquellos ambientes que sean agresivos, siendo el mantenimiento prácticamente nulo.
- Poseen una baja conductividad térmica y no producen interferencias con campos electro-magnéticos, lo que les hace insustituibles en algunas aplicaciones.
- Presentan gran libertad de formas y diseños, y existe la posibilidad de moldeo en grandes piezas, por lo que en ocasiones de difícil ejecución con materiales tradicionales, se puede contemplar su utilización sin ningún tipo de limitaciones desde el punto de vista de proceso de fabricación. Eligiendo el tipo de fibra y la matriz, el porcentaje de refuerzo y la orientación de las fibras, puede diseñarse el material con las características que requiera cada aplicación.

Pese a estas excelentes propiedades, su introducción en la construcción se está produciendo lentamente debido a varias razones:

- Elevado precio, muy superior al del acero, al menos por unidad de peso (la relación es menos desfavorable si se considera por unidad resistente). Los precios de estos materiales están bajando en los últimos años, al incrementarse la producción y desarrollarse métodos de fabricación más eficaces, como la pultrusión. Ya en la actualidad, si se considera el coste de manera global a lo largo de la vida útil el uso de FRP resulta competitivo en muchas ocasiones, sobre todo en refuerzos de estructuras, debido a la reducción de plazos de ejecución, coste de mano de obra, costes de mantenimiento, etc.
- Degradación de sus propiedades a temperaturas no excesivamente elevadas, provocada por el deterioro de la matriz polimérica, aunque las fibras que se utilizan son más resistentes a los efectos térmicos. Se considera normalmente temperatura crítica la temperatura de transición vítrea T_g de la matriz, que para resinas de poliéster, por ejemplo, es alrededor de 100°C.
- Inercia del sector, falta de conocimiento y experiencia por parte de los técnicos, y sobre todo falta de normativa y guías de diseño y construcción adecuadas, elaboradas sobre una base experimental firme.

2. Materiales compuestos en la construcción de puentes

Existe una gran variedad de aplicaciones de polímeros armados con fibras en puentes. Atendiendo a su funcionalidad, los principales formatos en que se aplican estos materiales son:

- Laminados de FRP para refuerzo exterior de puentes existentes. Se utilizan principalmente laminados de fibra de carbono y resina epoxi, que pueden ser de dos tipos: laminas prefabricadas (fibra+resina) que posteriormente se adhieren a la estructura, y hojas o tejidos de fibra que se aplican junto con la resina a la estructura formándose el material compuesto *in situ* al curar la resina.
- Redondos de FRP para armar el hormigón en lugar de la armadura de acero tradicional, sobre todo los tableros para evitar el acero y los consiguientes problemas de corrosión, mantenimiento, etc.
- Cables y tendones de pretensado, principalmente con fibra de carbono y aramida. Se utilizan debido a sus elevados módulo y resistencia específicos, excelentes comportamiento a fatiga y resistencia a la corrosión, para reducir costes de mantenimiento.
- Perfiles de FRP o elementos tipo sandwich como alternativa a la estructura clásica de hormigón armado o metálica en la construcción de pasarelas y puentes.

El uso de perfiles de FRP y paneles sandwich como elementos estructurales, que es quizás el menos extendido y el que más dificultades está encontrando, se describe en los siguientes apartados de este trabajo. Aunque son numerosas ya las aplicaciones en todo el mundo, en muchos casos se trata de proyectos de carácter demostrativo o proyectos singulares que por algún motivo especial requieren la utilización de estos materiales.

Los perfiles de FRP copian inicialmente las formas habituales de los perfiles metálicos, lo cual facilita de alguna forma en una primera fase el uso de los nuevos materiales, pero es necesario avanzar en la búsqueda de nuevas tipologías que permitan sacar provecho adecuadamente a sus propiedades y que muestren las ventajas potenciales sobre otros materiales. Lo mismo ocurre con las uniones de los perfiles, utilizándose inicialmente uniones atornilladas similares a las de estructuras metálicas. Las perforaciones en los perfiles de FRP cortan las fibras y generan puntos débiles con concentraciones de tensiones, por lo que se tiende al uso de uniones adhesivas, pero hay que estudiar cómo afectan a las propiedades del adhesivo las condiciones de aplicación en obra así como su posible envejecimiento.

Junto con el elevado precio del material, que supone un obstáculo más difícil de salvar en estructuras nuevas que en su uso como refuerzo, el riesgo de incendio es otro aspecto que está frenando la introducción de los perfiles de FRP, sobre todo en edificación. Ha sido mayor el desarrollo de aplicaciones en obra civil, concretamente pasarelas peatonales y puentes de pequeñas luces.

3. Estructuras híbridas

Se entiende por estructuras híbridas las superestructuras de puentes que combinan elementos de FRP con elementos de materiales tradicionales. Los estribos y pilares suelen ser de materiales tradicionales, aunque en los últimos años se ha desarrollado también un nuevo tipo de pilares híbridos formados por una camisa de FRP rellena de hormigón.

La tipología de puentes híbridos más comúnmente utilizada es la formada por tableros de

FRP sobre vigas metálicas, de hormigón o madera. Los tableros de FRP, además de la ventaja de no poseer armadura de acero con la consiguiente resistencia a la corrosión debida a las sales de deshielo, poseen un peso propio muy reducido (aproximadamente el 20% de un tablero de hormigón equivalente) combinado con una alta resistencia. Su reducido peso permite la instalación de los tableros en poco tiempo con una mínima interferencia al tráfico, así como un posible incremento de la sobrecarga permitida en puentes existentes en los que se reemplace el tablero de hormigón. En la actualidad son ya cientos de puentes con tableros de FRP los que están en servicio en todo el mundo.

En la figura 1 se muestran los tableros más comúnmente utilizados, que pueden dividirse en dos grupos: perfiles de pultrusión y paneles sandwich.

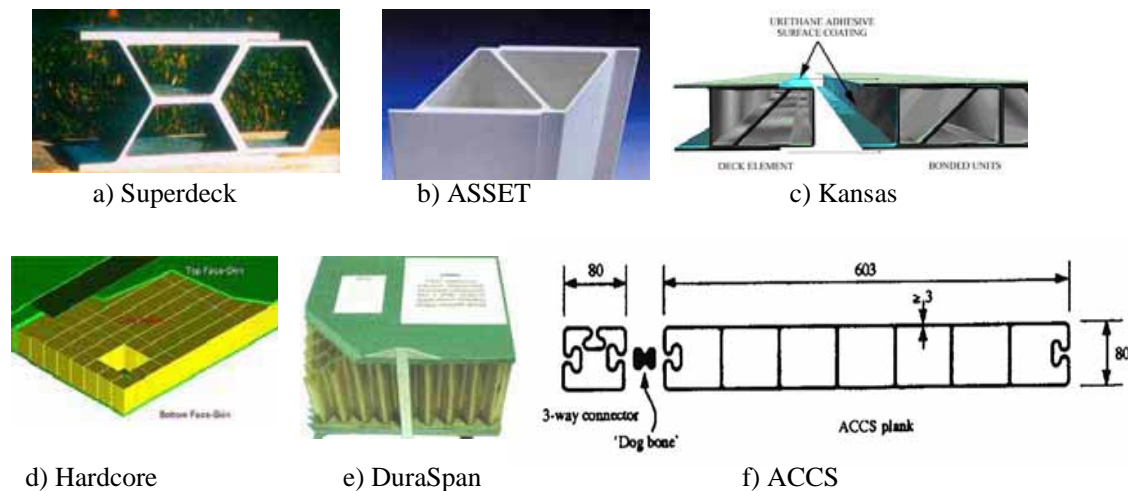


Figura 1: Tableros fabricados con FRP

La pultrusión es un proceso automatizado de fabricación de perfiles que básicamente consiste en tirar de los refuerzos impregnados en resina a través de una hilera o molde y aportar calor para que polimerice la resina. Los tableros pultruidos están hechos con fibras de vidrio con matrices de poliéster o viniléster. El tablero se forma con diversos perfiles unidos entre sí mediante adhesivo. Necesitan apoyarse sobre vigas principales, que suelen ser de materiales tradicionales.

Los paneles sándwich están formados por dos láminas o pieles de FRP, de espesor relativamente reducido y paralelas entre sí, adheridas a un medio distanciador muy ligero que constituye el núcleo. El proceso de fabricación permite cambiar fácilmente los componentes y su espesor adaptando las propiedades del panel sándwich a las requeridas en cada proyecto. Los dos sistemas más utilizados son los tableros Kansas y Hardcore. Se utilizan normalmente para pequeñas luces.

El tablero Hardcore se utilizó por primera vez en un puente vehicular en 1997 en Estados Unidos (*Magazine Ditch* en Delaware). El tablero se apoyaba en vigas de hormigón pretensado con una luz total de 23 m y una anchura de 8.2 m.

Los sistemas híbridos con vigas de FRP y tableros de materiales tradicionales son mucho menos utilizados que los anteriores. En algunos casos, como el *Tom's Creek Bridge*, construido en Estados Unidos en 1997, se combinan vigas de FRP (que estaban fabricadas con fibra de vidrio y fibra de carbono) con tablero de madera. El primer puente

carretero de materiales compuestos construido en España en 2004 pertenece a esta tipología. Se trata de un puente híbrido construido por Acciona con vigas de polímeros armados con fibra de carbono y tablero de hormigón armado. En el apartado 5 se describen brevemente algunos ensayos realizados para la construcción de este puente.



Figura 2: Primer puente de materiales compuestos construido en España (2004)

El primer puente híbrido que ha incorporado una concepción adaptada al material se construyó en el año 2000 en Estados Unidos (*King's Stormwater Channel Bridge*). Es un puente de dos vanos con 20,1 m de longitud y 13 m de anchura. Para los pilares y las vigas principales se usaron tubos de fibra de carbono rellenos con hormigón. El relleno de hormigón previene el pandeo de los tubos y a la vez sirve para anclar los elementos de conexión. El tablero es de fibra de vidrio.

4. Estructuras *all-composite*

Se entiende por estructura *all-composite* las superestructuras de puentes (vigas y tableros) hechas íntegramente de materiales compuestos. Usualmente los estribos y pilares son de materiales tradicionales. En estas estructuras son evidentes las diferencias entre concepciones de puentes tradicionales con una simple sustitución del material y los primeros pasos hacia concepciones adaptadas a las propiedades del FRP.

Puentes con concepción de sustitución se han construido desde los años 80. A este tipo pertenecen las primeras pasarelas construidas en Estados Unidos y Canadá (perfiles pultrusionados de Strongwell y Creative Pultrusion). Tienen una luz máxima de 25 m, y en la actualidad se han construido unas 200 pasarelas.

La primera pasarela *all-composite* en Europa es la de Aberfeldy, Escocia, en 1992. En esta todos los componentes son de FRP (pilonos, cables, vigas, tablero). Muchas de las uniones son adhesivas, sólo para las conexiones entre los cables y las vigas transversales se usaron uniones mecánicas.

En la pasarela de Kolding Dinamarca (1997), en cambio, se usaron sólo uniones mecánicas. A finales de 1997 se construyó también la de Pontresina, en Suiza, formada por dos vanos, en uno de los cuales se usaron uniones atornilladas y en el otro adhesivas. Esta pasarela sólo se utiliza en invierno, y se monta y desmonta todos los años.



Figura 3: Pasarelas de Aberfeldy y Pontresina

En 2001 se construyó la primera en España, sobre la línea del AVE cerca de Lérida. Es un arco biapoyado de 38 m de luz y 3 m de ancho. Se emplearon uniones mecánicas.



Figura 4: Pasarela sobre el AVE en Lérida, proyecto de PEDELTA

En cuanto a puentes vehiculares, en 1982 se construyó el primer puente de carretera en el mundo, en China (*Miyun Bridge*), que tiene una luz de 20,7 m. El puente consta de 6 vigas sandwich laminadas a mano de fibra de vidrio/poliéster.

Los sistemas de tableros indicados en la figura 1 se han utilizado también para puentes *all-composite*. Así, en 1994 se construyó un puente levadizo (*Bonds Mill Lift*) utilizando el sistema modular ACCS. El primero que se construyó en Estados Unidos fue el *No-Name Creek Bridge*, en 1996, utilizando un tablero sándwich tipo Kansas. En el año 2002 se construyó en Oxfordshire un puente prototipo (*West Mill Bridge*) que formaba parte de un proyecto europeo de investigación en el que se desarrolló el perfil ASSET, fabricado por Fiberline. El tablero está formado por perfiles ASSET de fibra de vidrio y las vigas son perfiles estándar de fibra de vidrio reforzados con fibra de carbono (figura 5). Todas las uniones son adhesivas. El tablero formado por perfiles ASSET se ha utilizado posteriormente en otros puentes con vigas metálicas.

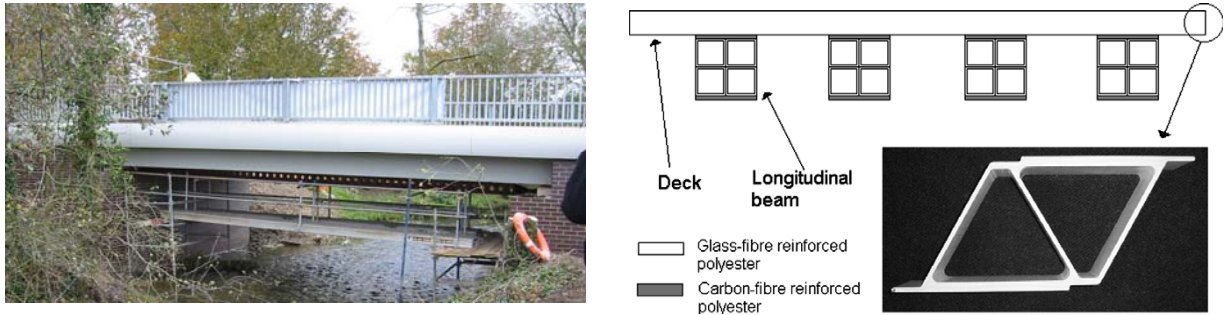


Figura 5: Puente West Mill (Oxfordshire, UK)

5. Ensayos para la construcción de un puente híbrido FRP-hormigón

Como se ha indicado, la mayoría de los puentes construidos hasta el momento tienen carácter demostrativo, y muchos han sido construidos en el marco de proyectos de investigación. La falta de normativa y guías de diseño, junto a la enorme variabilidad de aplicaciones y la falta de estandarización de los componentes de FRP, hace que frecuentemente se requiera la realización de programas experimentales específicos encaminados a confirmar los cálculos teóricos y a estudiar problemas concretos como detalles de uniones, rigidizadores, etc. que hasta el momento han sido sólo parcialmente resueltos.

En este apartado se describen algunos de los ensayos realizados en el IETcc durante la fase final de diseño del primer puente carretero de materiales compuestos construido por Acciona en España. Es un paso vehicular de 46 metros de luz situado en la Autovía del Cantábrico, muy próximo al Aeropuerto de Asturias. Se trata de un puente híbrido formado por tres vigas continuas de CFRP (polímeros armados con fibra de carbono) y losa de hormigón armado. Las vigas tienen 46 m de longitud, con cuatro vanos de 10, 13, 13 y 10 m.

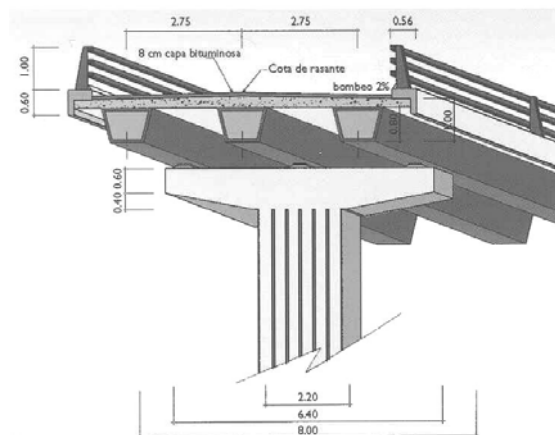


Figura 6: Configuración del puente

El principal objetivo de los ensayos es comprobar los datos obtenidos analíticamente respecto a carga última, rigidez, comportamiento de los conectores viga-losa,

rigidizadores, posibilidad de pandeo de las almas de la viga, efectos locales sobre los apoyos, o en la unión viga-losa, etc.

Se realizó el ensayo de tres probetas a escala 1/3, cada una representaba una viga FRP con losa de hormigón armado, de una longitud igual a la mitad de la longitud total (dos vanos). Se fabricaron dos tipos de viga, una utilizando mayoritariamente fibra de vidrio, y fibra de carbono en la cara inferior, y la otra sólo con fibra de carbono. Del primer tipo se hizo una probeta, y del segundo tipo dos probetas de las cuales una se fabricó de un solo tramo y la otra uniendo dos tramos de viga mediante la aplicación de capas de fibra y resina.

Durante el ensayo se mide la carga aplicada, las flechas mediante captadores de desplazamientos situados en los vanos y sobre los apoyos, y las deformaciones en diferentes posiciones mediante bandas extensométricas pegadas sobre la superficie de las vigas de FRP y también en la losa de hormigón, tanto en las secciones de centro de vano como en los apoyos.

En el ensayo se carga sucesivamente en los dos vanos hasta niveles de servicio y se descarga. Finalmente se carga simultáneamente en los dos vanos hasta rotura.

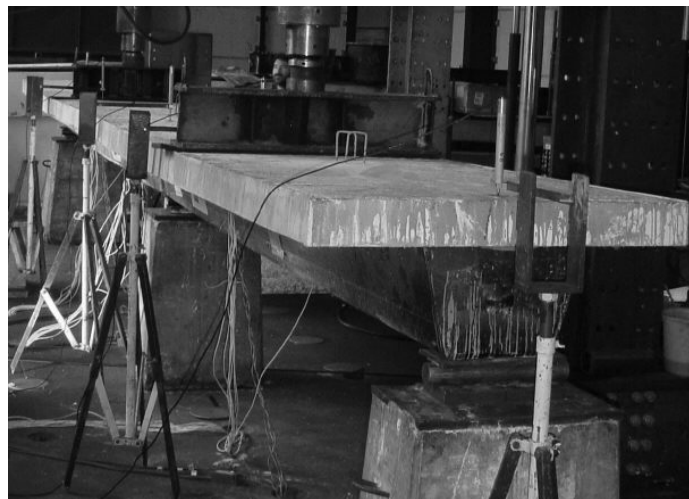


Figura 7: Disposición del ensayo

En la fig 8 se comparan las curvas carga-flecha en cada uno de los vanos para la probeta nº 1 (fibra de vidrio) y las nº 2 (fibra de carbono sin junta) y nº 3 (fibra de carbono con junta). Los captadores de desplazamiento se retiraron antes de alcanzarse la carga última.

En la figura 9 se muestran la evolución de las deformaciones al aumentar la carga en el ensayo de la probeta nº 1 a lo largo de la sección medidas en los centros de vano y en el apoyo central.

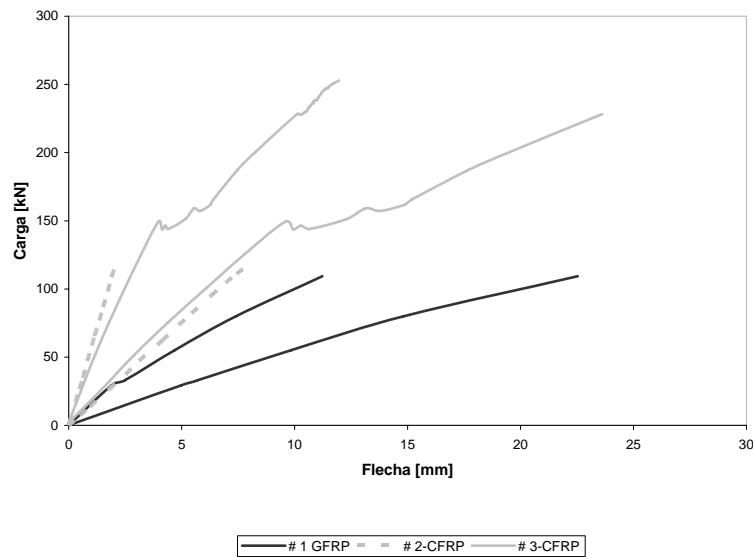


Figura 8: Curvas carga-flecha

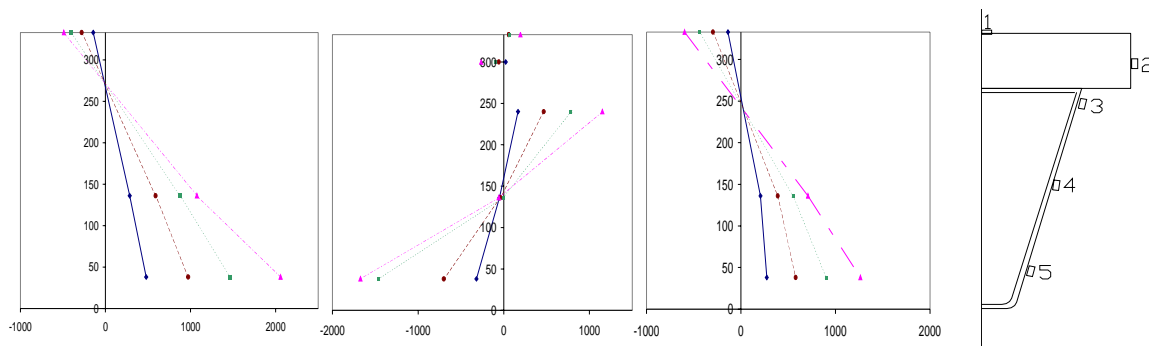


Figura 9: Evolución de la deformación en el ensayo de la probeta nº 1

El modo de fallo en las tres probetas fue similar. El fallo se produjo sobre el apoyo central con rotura de los conectores viga-losa. La carga última en la probeta de fibra de vidrio fue de 126 kN. En las dos probetas de fibra de carbono se produjo un primer fallo en el apoyo central para una carga de alrededor de 150 kN, después del cual se siguió cargando alcanzándose 241 y 293 kN respectivamente.

Mediante la realización de los ensayos se confirmaron los cálculos teóricos realizados y se demostró la viabilidad de aplicar esta tipología híbrida FRP-hormigón a puentes reales.

La principal limitación en el diseño de estos puentes no viene dada por los estados límites últimos sino por la limitación de flechas, especialmente en el caso de vigas de fibra de vidrio. Las vigas ensayadas fabricadas únicamente con fibra de carbono sí cumplen los requerimientos de rigidez.

Los ensayos mostraron el comportamiento lineal de la sección y el funcionamiento adecuado de los conectores viga-losa hasta niveles de carga muy superiores a los requeridos.



Figura 10: Fallo de la probeta de fibra de vidrio sobre el apoyo central con rotura de los conectores

6. Conclusiones

La utilización de materiales compuestos en la construcción de puentes es ya una realidad. Las principales ventajas que ofrecen los materiales compuestos frente a los tradicionales son bajo peso, elevada resistencia, reducidos tiempos de instalación y resistencia a la corrosión. Las desventajas que han dificultado su aplicación hasta el momento son: elevado coste del material, sobre todo de la fibra de carbono, falta de experiencia con respecto a durabilidad y comportamiento a largo plazo y falta de normativas y guías de diseño. El inconveniente del coste del material en muchos casos no es tal si se consideran, como debe hacerse, los costes a lo largo de la vida útil de la estructura. Las aplicaciones realizadas están sirviendo de modelo para el estudio del comportamiento a largo plazo y han demostrado la viabilidad de utilización de FRP en pasarelas y puentes de pequeñas luces.

En los últimos veinte años se ha realizado un gran avance en este campo, tanto a nivel de investigación como de aplicaciones. Las principales líneas de investigación en las que es necesario profundizar son: búsqueda de nuevas formas estructurales que aprovechen las cualidades del nuevo material, durabilidad, uniones adhesivas, métodos de fabricación económicos y desarrollo de normativa.